

РАСПРЕДЕЛЕННАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА СБРОСОВ ПРЕДПРИЯТИЙ-ПРИРОДОПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ В ВОДНЫЙ БАССЕЙН ДЛЯ МИНИМИЗАЦИИ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО УЩЕРБА

Дружинин Ю.О., Соколов В.В.

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,

Россия, г. Москва, ул. Профсоюзная д.65

ydruzhin@rambler.ru, sok@ipu.ru

Аннотация: Предлагается методика расчета буферных емкостей для временного хранения сточных вод, содержащих загрязняющие вещества, предприятий-водопользователей и алгоритмы минимизации загрязнения реки при авариях, сопровождаемых неконтролируемым разливом загрязняющих веществ. Предлагается структура распределенной управляющей системы сбросами предприятий-водопользователей в водный бассейн.

Ключевые слова: мониторинг, распределенная управляющая система, статическое расписание, рациональное водопользование

В настоящее время в нашей стране активно продвигается концепция систем мониторинга качества [1] и управления качеством [2] природных поверхностных вод. Эта концепция учитывает существующую методику составления регламентов сбросов загрязняющих веществ (ЗВ) предприятиями-водопользователями в водный бассейн. Ключевыми расчетными параметрами методики являются нормативы допустимых сбросов веществ и микроорганизмов в водные объекты для водопользования (НДС), выводимые из предельно допустимых концентраций (ПДК).

Известен ряд подходов к решению экологических задач, возникающих при составлении регламентов сбросов предприятий-природопользователей в водный бассейн. Для формирования модели водного объекта водоток разбивается на секции с постоянным расходом, в пределах которых все параметры модели можно принять постоянными, границы секций совмещаются с местами сброса сточных, в том числе и дренажных вод, водозаборами, устьями притоков, створами, в которых контролируется качество воды, и местами резкого изменения гидрометрических характеристик водотока. При совпадении места водозабора с местом сброса сточных, в том числе дренажных вод или устьем притока для этого водозабора вводится отдельная секция нулевой протяженности. Для каждого притока и основной реки помимо створов контроля качества воды указывается расчетный створ в устье и начальный створ и качество воды в истоке реки. Все створы нумеруются последовательно от истока к устью для каждого притока и основной реки. Аналогично нумеруются расчетные секции. Речная система представляется как ориентированный граф с вершинами или узлами, соответствующих местам сброса сточных, в том числе и дренажных вод, водозаборами, устьями притоков, створами, в которых контролируется качество воды, и местами резкого изменения гидрометрических характеристик водотока.

Большинство регламентов рассчитано на непрерывный сброс ЗВ предприятиями-природопользователями, что приводит к перемешиванию их стоков. В перемешанных таким образом стоках разных ЗВ, даже в случае их концентраций, много меньших предельно допустимых, могут протекать реакции, в результате которых возможно появление непредсказуемых ядовитых или канцерогенных веществ.

Предприятия-природопользователи представляют собой точечные источники сбросов ЗВ. Для них характерна регулярность и их можно рассматривать как стационарные. Они фиксированы на местности, а нагрузки ЗВ оцениваются по непосредственным замерам, известным технологиям производства и т.д. Качество воды в заданном сечении водотока определяется суммарной нагрузкой от совокупности источников, объемов потока воды и последующего разбавления и распада загрязняющих веществ в условиях установившегося течения. При преобладании на водосборе точечных источников концентрация ЗВ в водном объекте является гиперболической функцией потока, так как концентрация ЗВ в потоке сокращается при увеличении объема протекающей воды за счет разбавления.

Нами была принята модель речной системы, в виде ориентированного графа $D = (V, E)$, имеющего N вершин ($N = |V|$), из которых N_1 соответствуют устьям притоков, N_2 – местам сброса сточных и дренажных вод предприятий-водопользователей (точечных источников ЗВ), N_3 – точкам бифуркации, N_4 – устьям реки. Каждое ребро $\{u, v\} \in E$, ($u, v \in V$) соответствует отрезку реки и характеризуется средней скоростью потока \bar{v}_i , средней площадью сечения \bar{S}_i и длиной l_i [3, 4].

Потребность каждого из N_2 предприятий-водопользователей за период T состоит в сбросе ЗВ K типов суммарной массой G_i .

Дополнительные условия: 1) консервативный характер ЗВ, которые подвергаются только разбавлению; 2) запорные устройства обеспечивают сброс ЗВ со скоростью течения реки и в объемах, соответствующих c_{kmax} . 3) сбросы ЗВ разных предприятий-водопользователей не должны смешиваться.

Ставилась задача определить возможность составления расписания циклических сбросов ЗВ для N_2 предприятий-водопользователей по всем типам ЗВ массой G_{ik} ($i \in (1, N_2), k \in (1, K)$) за период T , чтобы на протяжении всей водной системы для концентрации k – го ЗВ (все вещества с одинаковым лимитирующим показателем вредности) выполнялось условие $c_{ik} \leq c_{kmax}$ (где c_{ik} – концентрация k – го ЗВ от i – го предприятия-водопользователя, c_{kmax} – предельно допустимая концентрация k – го ЗВ).

Если полученное при составлении расписания расчетное время цикла сброса T_e больше заданного, т.е. не выполняется условие, то это означало, что при заданных значениях G_i расписание составить невозможно и требуется определить новые значения масс ЗВ $G_i^* \leq G_i$, которые удовлетворят заданным условиям.

Был принят ряд допущений: расход сточных вод Q_{1i} для i – го предприятия много меньше расхода вод реки Q_{2i} , ($Q_{1i} \ll Q_{2i}$), коэффициент смешения $a = 1$, смешение производится мгновенно.

В работе [3] предлагалась методика составления расписания сбросов сточных вод предприятиями-водопользователями, оптимального с точки зрения экологии. При этом не учитывались фактические потребности предприятий-водопользователей в сбросе некоторой массы загрязняющих веществ (ЗВ) за фиксированный промежуток времени (например, за сутки). Кроме того, предполагалось, что разбавление ЗВ до максимально допустимой концентрации, происходило только на отрезке реки между двумя предприятиями-водопользователями.

В работе [4] с единых позиций было описано составление расписания для основных вариантов топологии гидрографии реки: участок реки без притоков, впадение притоков в основное русло, бифуркация реки, слияние потоков после бифуркации.

Вместе с тем предложенный алгоритм составления расписания носил директивный характер и не предусматривал реагирование на изменения в гидрологической обстановке. То есть в нем отсутствовала обратная связь от системы мониторинга сбросов ЗВ заводами-водопользователями (нарушение графика сбросов, аварии, сопровождающиеся неконтролируемым разливом ЗВ) и состояния реки (паводок, ледостав и т.д.).

Рассмотрим организацию сброса ЗВ заводом-водопользователем.

В настоящее время расчет массы загрязнений M_i , кг/сут., осуществляется по методике Минприроды РФ по формуле:

$$(1) \quad M_i = c_i Q_i / 10^3,$$

где c_i – концентрация i –го загрязнения, содержащегося в сточных водах;

Q_i – расход сточных вод, м³/сут

Расход сточных вод принимается в соответствии с балансовой схемой рационального использования водных ресурсов промышленного предприятия (завода-водопользователя). Расход сточных вод промышленного предприятия $Q_{п.п.}$ определяется по формуле:

$$(2) \quad Q_{п.п.} = Q_{техн.} + Q_{х.б.} + Q_{душ.}$$

где $Q_{\text{техн.}}$ – расход сточных вод, образующихся в процессе функционирования технологического оборудования, м³/ч;

$Q_{\text{х.б.}}$ – расход хозяйственно-бытовых сточных вод, м³/ч;

$Q_{\text{душ.}}$ – расход сточных вод, образующихся после приема работающих душа

Расход стоков, образующихся в процессе функционирования технологического оборудования $Q_{\text{техн.}}$, м³/сут, определяется либо на основе анализа паспортов данного технологического оборудования, либо по формуле:

$$(3) \quad Q_{\text{техн.}} = \frac{N_{\text{техн.}} \cdot q_{\text{техн.}}}{10^3},$$

где $N_{\text{техн.}}$ – количество единиц продукции, выпускаемой на данном оборудовании за сутки;

$q_{\text{техн.}}$ – удельный расход воды на единицу выпускаемой продукции, л/сут.

Соответствующие формулы позволяют вычислить $Q_{\text{х.б.}}$ и $Q_{\text{душ.}}$

Для того, чтобы перейти от непрерывного слива в соответствии с текущими правилами к импульсному сливу в соответствии с жестким расписанием для минимизации нагрузки на экологию реки, требуется ввести на предприятиях буферную емкость (цистерну или водоем), где отходы будут скапливаться до момента их сброса в реку.

Цель работы определить необходимый объем буферной емкости для хранения ЗВ каждого предприятия-природопользователя и составить алгоритм минимизации ущерба как от аварийного сброса ЗВ на предприятиях-водопользователях, охваченных системой управления, так и внешних по отношению к ним источников загрязнения.

В идеальном случае для буферной емкости, в которой хранятся ЗВ i -го предприятия до момента их сброса должно выполняться условие:

$$(4) \quad \int_0^T m_i(t) dt = 0,$$

где $m_i(t)$ – функция изменения массы ЗВ i -го предприятия в буферной емкости.

Это означает, что к моменту начала следующего цикла сброса ЗВ T буферная емкость должна быть очищена, чтобы не происходило ее переполнение.

На практике условие (4) трудно выполнимо, так как, наряду с растворимыми ЗВ, имеются и нерастворимые ЗВ, оседающие в процессе седиментации на дне буферной емкости. Это предполагает профилактические работы через определенное регламентом число циклов слива.

Сам цикл наполнения/опорожнения буферной емкости может быть представлен следующим образом:

$$(5) \quad \int_0^T m_{1i}(t) dt - \int_{T-t_i^*}^T m_{2i}(t) dt = 0,$$

или

$$(6) \quad \int_0^T m_{1i}(t) dt = \int_{T-t_i^*}^T m_{2i}(t) dt,$$

где $m_{1i}(t)$ – функция наполнения буферной емкости ЗВ, $m_{2i}(t)$ – функция сброса ЗВ из буферной емкости, t_i^* – время сброса в реку.

Функция $m_{1i}(t)$ является знакоположительной, но имеет произвольный характер, Функция $m_{2i}(t)$ – линейная функция.

Переходим от весовых к объемным характеристикам:

$$(7) \quad \int_0^T c_{1i}(t) Q_{1i}(t) dt = \int_{T-t_i^*}^T c_{2i}(t) Q_{2i}(t) dt,$$

где $c_{1i}(t)$ – концентрация ЗВ в сбросах в буферный водоем, $c_{2i}(t)$ – концентрация ЗВ в реке, T – время периода сбросов заводов, для которых составлено расписание, t_i^* – время, выделенное по

расписанию на сброс ЗВ с завода-водопользователя, $Q_{1i}(t)$, $Q_{2i}(t)$ – потоки (расход стоков) в ЗВ в бассейн и из бассейна в реку.

В первом приближении можно считать концентрацию ЗВ c_{2i} и поток Q_{2i} постоянными величинами не зависящими от времени (не меняющимися во времени), тогда выражение (7) приобретет следующий вид:

$$(8) \quad \int_0^T c_{1i}(t)Q_{1i}(t)dt = c_{2i}Q_{2i}t_i^*$$

Отсюда можно определить объем буферного водоема для ЗВ i -го предприятия (V_i):

$$(9) \quad V_i = \frac{1}{T} \int_0^T c_{1i}(t)Q_{1i}(t)dt,$$

Фактически же объем буферного водоема V_i для ЗВ должен быть больше, чтобы предотвращать сброс ЗВ во время устранения аварий на заводах-водопользователях, объединенных системой управления, или прохождения ЗВ, от внешних по отношению к системе источников (например, разлив ЗВ при аварии транспортного средства).

Возможные следующие аварийные случаи:

- продолжение слива ЗВ предприятием-водопользователем дольше отведенного ему по расписанию времени;
- авария на очистных сооружениях предприятия-водопользователя и попадание в реку ЗВ с концентрацией c_i , превышающей предельно допустимую концентрацию;
- разлив ЗВ от внешних по отношению к системе источников.

1. Если i -е предприятие-водопользователь продолжает слив ЗВ за пределами отведенного ему времени t_i^* , то есть в течение t_i^+ , то расположенное ниже по течению реки $i+1$ – предприятие должно изменить начало слива ЗВ на время, равное $t_i^+ - t_i^*$, иначе произойдет смешение ЗВ. Но это изменение не является локальным, так как потребуются изменить расписание сбросов ЗВ и другими предприятиями-водопользователями. При корректировке расписания следует учитывать также, что ее нельзя рассматривать как простой сдвиг во времени начала сброса, так как наполнение буферных емкостей сбросами ЗВ может носить нелинейный характер

Перенесение начала сброса ЗВ на более позднее время означает превышение расчетных объемов ЗВ в буферных емкостях на предприятиях, расположенных ниже по течению, а вместе с этим и продолжительности времени слива.

$$(10) \quad \Delta t_{i+1}^* = \frac{\int_0^{t_i^+ - t_i^*} c_{1i+1}(t)Q_{1i+1}(t)dt}{c_{2i+1}Q_{2i+1}},$$

где Δt_{i+1}^* - избыточное время слива $i+1$ -го предприятия, вызванное превышением времени слива ЗВ в i -ом предприятии.

То есть в терминах теории расписаний для отрезка реки без притоков и бифуркаций мы получим при избыточном сбросе на k -ом предприятии при однократном воздействии

$$(11) \quad \left\{ \begin{array}{l} S_1(j) = 0 \\ C_i(j) = S_1(j) + t_1^* \\ \dots \\ S_k(j) = C_{k-1}(j) + t_{k-1} = S_{k-1}(j) + t_{k-1} + t_{k-1}^*, \quad 1 < k \leq N_2, j = 1 \\ C_k(j) = S_k(j) + t_k^* \\ S_{k+1}(j) = C_k(j) + t_k \\ C_{k-1}(j) = S_{k+1}(j) + t_{k+1}^* + \Delta t_{k+1}^*(j) \\ \dots \\ C_{N_2}(j) = C_{N_2}(j) + t_{N_2}^* + \Delta t_{N_2}^*(j) = \sum_{i=1}^{\dots N_2} t_i^* + t_k^+ - t_k^* + \sum_{i=k+1}^{N_2} \Delta t_i^*(j) + \sum_{i=1}^{N_2} t_i \end{array} \right.$$

где j – номер цикла сброса, $S_i(j), C_i(j)$ – времена начала и завершения сброса ЗВ для i -го источника ЗВ, в j -м цикле, $\Delta t_{k+1}^*(j)$ – увеличение времени слива, вызванное избыточным накоплением ЗВ в буфере, как будет показано ниже, эта величина может зависеть от цикла сброса.

Таким образом, при избыточном сливе на k -ом предприятии получаем превышение времени цикла перед расчетным (или фактическим при нормальной работе предприятий):

$$(12) \quad \Delta T = t_k^+ - t_k^* + \sum_{i=k+1}^{N_2} \Delta t_i^*(j)$$

При конвейерной организации последовательного сброса, когда следующий цикл сбросов ЗВ может быть начат через $T^* < T_e$ одновременно с продолжающимся транзитом объемов ЗВ предыдущего цикла, при соблюдении условия, при котором начало потока текущего цикла сбросов ЗВ нагонит конец потока предыдущего цикла сбросов ЗВ в месте слива последнего источника ЗВ:

$$(13) \quad S_1(2) + \sum_{i=1}^{N_2-1} t_i = S_1(1) + \sum_{i=1}^{N_2} t_i^* + t_k^+ - t_k^* + \sum_{i=k+1}^{N_2} \Delta t_i^*(j) + \sum_{i=1}^{N_2-1} t_i$$

Обозначим

$$(14) \quad T^* = \sum_{i=1}^{N_2} t_i^* + t_k^+ - t_k^* + \sum_{i=k+1}^{N_2} \Delta t_i^*(j)$$

тогда:

$$(15) \quad S_1(2) = S_1(1) + \sum_{i=1}^{N_2} t_i^* = S_1(1) + T^*$$

$$(16) \quad \left\{ \begin{array}{l} S_1(j) = (j-1)T^* \\ C_1(j) = S_1(j) + t_1^* \\ \dots \\ S_i(j) = C_{i-1}(j) + t_{i-1} = S_{i-1}(j) + t_{i-1}^* + t_{i-1} \\ C_i(j) = S_i(j) + t_i^* \\ \dots \\ S_{N_2}(j) = C_{N_2-1}(j) + t_{N_2-1} = S_{N_2-1}(j) + t_{N_2-1}^* + t_{N_2-1} \\ C_{N_2}(j) = S_{N_2}(j) + t_{N_2}^* \end{array} \right. , j \in (1, \infty)$$

где j – номер цикла сброса, $S_i(j), C_i(j)$ – времена начала и завершения сброса ЗВ для i -го источника ЗВ, в j -м цикле.

При составлении нового расписания необходимо проверить условие:

$$(17) \quad T^* + \Delta T \leq T_e,$$

Где T^* – время фактического выполнения цикла расписания при нормальных условиях, ΔT – превышение времени, вызванное избыточным сливом, T_e – крайний директивный срок выполнения всех сбросов цикла.

Если это условие выполняется, то осуществляется перерасчет расписания сливов ЗВ на $N_2 - k$ предприятиях, расположенных ниже по реке k -ого предприятия, на котором превышено заданное время сброса ЗВ T_e .

Если условие (17) не выполняется, то расположенные ниже по течению предприятия сбрасывают ЗВ за промежутки времени, допустимые с точки зрения крайнего директивного сброса ЗВ T_e . Оставшиеся в буферах ЗВ сбрасываются в следующих циклах так, чтобы избыточные объемы ЗВ в буферах сокращались, но выдерживалось крайнее директивное время сброса.

В случае, если нормальный цикл требуется восстановить в минимальный срок, то избыточные объемы ЗВ сбрасываются в реку за счет времени, выделенного для предприятия, нарушившего расписание. Иными словами, выделяемый на это предприятие лимит времени распределяется между другими предприятиями, чтобы они сбросили образовавшийся сверхнормативный запас ЗВ в реку без ухудшения экологии.

2. Авария на очистных сооружениях предприятия-водопользователя и попадание в реку ЗВ с концентрацией c_i , превышающей предельно допустимую концентрацию, или разлив ЗВ от внешних по отношению к системе источников.

В этих случаях важнее всего не допустить попадание ЗВ в буферные емкости, так как вода для растворения ЗВ поступает на завод-водопользователь из реки по трубам, расположенным выше его по реке. Таким образом, исходя из размера и скорости движения объема сброса ЗВ по реке, можно вычислить время появления и прохождения этого сброса мимо водозабора i -ого предприятия. При этом забор воды прекращается ($Q_{1i}(t) = 0$). После прохождения объема сброса поток воды $Q_{1i}(t)$ увеличивается до величины, обеспечивающей требуемое значение концентрации ЗВ в буферной емкости. Кроме того, блокируется сброс ЗВ с завода-водопользователя, мимо которого проходит объем избыточного сброса ЗВ. Полученное в итоге расписание будет иметь структуру, подобную (16).

Необходимость реагировать не только на сезонные и метеорологические изменения гидрологического режима реки, но и на разного рода техногенные аварии требует применения распределенной системы мониторинга и управления сбросами ЗВ заводами водопользователями.

Распределенный характер системы предполагает использование беспроводных информационных сетей.

В центральный сервер системы поступают данные как с локальных станций, установленных на заводах-водопользователях, так и с разного рода датчиков сбора гидрологической информации на реках водной системы. На центральном сервере хранится цифровая гидрологическая карта речной системы, к ней привязаны координаты заводов-водопользователей. На центральную станцию системы поступает гидрометеорологическая информация, в том числе прогноз погоды, позволяющий скорректировать расписание сбросов ЗВ.

Локальные станции заводов-водопользователей передают в центральную станцию информацию о потоках сточных вод, текущем объеме и концентрации ЗВ в буферных емкостях, о положении задвижек впускных и выпускных труб. С этих локальных станций передается также информация о состоянии очистных сооружений. С центральной станции в локальные станции поступают расписания сброса ЗВ и забора воды из речной системы.

Гидрометеорологические датчики передают в центральную станцию информацию о состоянии речных потоков и превышении допустимых концентраций ЗВ на отдельных участках реки. С центральной станции на них поступают запросы на проведение измерений и автоматическое тестирование их оборудования.

Таким образом, в данной работе были получены следующие результаты:

- предложена методика расчета объемов емкостей для хранения ЗВ при реализации выбранного режима сброса;
- показаны способы коррекции расписаний сброса ЗВ в случае аварий;
- приведены соображения о структуре распределенной системы мониторинга и управления сбросами ЗВ заводами водопользователями.

Литература

1. Баренбойм Г.М., Венецианов Е.В., Авандеева О.П. и др. Научные основы создания систем мониторинга качества природных поверхностных вод. М.: Научный мир, 2016. – 462 с.
2. Степановская И.А., Авандеева О.П. Цифровой подход к управлению качеством поверхностных вод / Труды 11-й Международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD'2018, Москва), под общей редакцией С.Н.Васильева, А.Д.Цвиркуна, М.: ИПУ РАН, 2018. Т.2. С. 239-245.
3. Соколов В.В., Дружинин Ю.О. Концепция виртуального полигона отработки регламентов сбросов предприятий-природопользователей в водный бассейн // Труды 12-й Международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD-2019, Москва), под общей редакцией С.Н.Васильева, А.Д.Цвиркуна, М.: ИПУ РАН, 2019. С. 1089–1093.
4. Соколов В.В., Дружинин Ю.О. Составление расписаний циклов переменных по объему сбросов предприятий-природопользователей в водный бассейн // Труды 13-й Международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD-2020, Москва), под общей редакцией С.Н.Васильева, А.Д.Цвиркуна, М.: ИПУ РАН, 2020. С.1718-1724.